

CAR MOTION WITH REDUCED TIRE PRESSURE – EXPERIMENT VS. SIMULATION

Jakub ZĘBALA¹, Wojciech WACH¹, Piotr CIĘPKA¹, Robert JANCZUR²

¹*Institute of Forensic Research, Kraków, Poland*

²*Faculty of Mechanical Engineering, Cracow University of Technology, Kraków, Poland*

Abstract

In the paper, the results of research on car movement with reduced and no tire pressure have been presented. The study included bench tests, parameterization of the mathematical model of the tested car, road tests and simulations in PC-Crash. The road tests involved driving a car with reduced and no tire pressure on a curvilinear track. Simulations were carried out using a bilinear tire model, and the results were compared with those obtained in experiments.

Key words

Bypassing manoeuvre; Reduced tire pressure; No tire pressure; Simulation; PC-Crash; Bilinear tire model.

Received 24 January 2014; accepted 20 February 2014

1. Introduction

Road accident reconstruction includes the reconstruction of car motion after a crash. This motion is often disturbed by pressure reduction in one of the wheels resulting from tire damage due to the collision, the vehicle driving over the elements of damaged vehicles or the tire bead slipping off the rim during the accident. In an extreme case, the tire becomes completely deflated, which causes the vehicle to tilt, decreases the cornering stiffness and radial tire stiffness, as well as increasing rolling resistance, which in turn affects the vehicle's dynamic characteristics: stability and steerability [3, 5]. The motion of a car with reduced tire pressure along a straight track has been investigated thoroughly and the research results published seem sufficient for the needs of accident reconstruction [3, 4]. The tests presented in the present study, therefore, covered vehicle motion with reduced and no tire pressure on a curvilinear track adequate for bypassing an unexpectedly appearing obstacle. In motion on a curvilinear track, lateral forces occur, which make a dam-

aged tire slide along the rim. This changes the friction coefficient both of the tire-road surface and the tire-steel rim. The vehicle's lateral dynamics is strongly affected by the reduction of a tire's resistance to lateral slip. All these phenomena mean that an expert cannot state definitely whether in a given case, when driving a car with a damaged tire, the driver could effectively bypass an obstacle.

Popular tools used in accident reconstruction include the PC-Crash program. However, in the program there is no data base of real characteristics of tires: only default characteristics of bilinear and TMeasy tire models are available, which is a serious limitation of the program. This refers in particular to the TMeasy model, which requires knowledge of ten parameters. In the present study, an attempt was made to simulate in this program the motion of a given vehicle with reduced and no tire pressure using only the bilinear tire model (Figure 1). It is the simplest model, in which a change in tire lateral force characteristics is made by an alteration of the value of a single parameter – the maximum slip angle.

A single parameter modifying a model significantly reduces the number of simulations that need to be carried out in order to obtain a correct result. It is possible for such a result to be as accurate as the result of a simulation using a more advanced model with a larger number of parameters.

2. Aim and scope of the paper

The aim of the research was as follows:

- determination of the effect of reduced pressure in one selected tire on stability and steerability of a car during the bypassing of an unexpected obstacle on a straight road section;
- determination of the conditions of applicability of the bilinear tire model used in PC-Crash in simulation of an analogous manoeuvre – determining uncertainty range;
- formulation of practical guidelines for both real and simulated car movement.

This aim was achieved by means of bench tests and road experiments, during which the vehicle motion parameters were recorded. Next, simulations were performed, and the results were compared with those obtained in the experiments. A 1999 Daewoo Nubira passenger car with Pirelli P6000 185/65 R14 86H tires was used for the study.

3. Bench tests

The aim of the bench tests was parameterisation of the car model (Daewoo) in the PC-Crash program for vehicle accident simulation. These included determination of: mass distribution, centre of gravity (CG) location in 3D, moment of inertia about the vertical axis, characteristics of suspension stiffness, and the steering ratio (Table I). Roll and pitch moments of inertia listed in Table I were calculated using Bixel's formulas [2].

TABLE I. TECHNICAL DATA OF TESTED CAR

Variable	Value
Vehicle mass	1374 kg
Distance of CG from front axle	1.108 m
CG height	0.54 m
Steering system ratio	16.9 : 1
Stiffness coefficient – front right wheel suspension	16,500 N/m
Stiffness coefficient – front left wheel suspension	23,800 N/m
Stiffness coefficient – rear right wheel suspension	23,400 N/m
Stiffness coefficient – rear left wheel suspension	22,900 N/m
Moment of inertia – roll	588 kgm ²
Moment of inertia – pitch	2380 kgm ²
Moment of inertia – yaw	2478 kgm ²

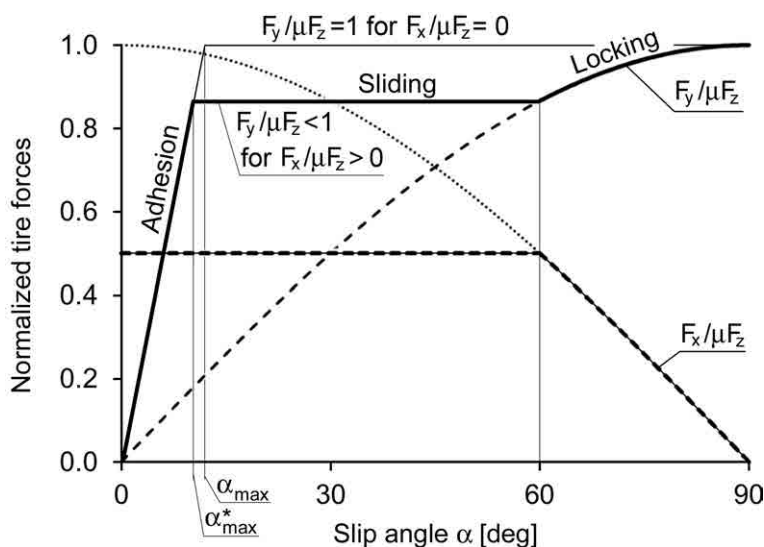


Fig. 1. Normalized lateral and longitudinal forces as functions of tire slip angle; notation: F_x , F_y , F_z – longitudinal, lateral and normal forces respectively, μ – friction coefficient of tire to road surface, α_{\max} – maximum slip angle (tire constant), α_{\max}^* – maximum slip angle in given state of movement.

The tested car was not specially prepared for testing. Before the tests it was used regularly and repairs were performed as required in order to keep the vehicle in good condition.

4. Road tests

The road tests were performed on a flat and horizontal section of a concrete surface in summer conditions. The lane change path, shown in Figure 2, was delineated in accordance with recommendations of norm BN-90/3615-/06, the aim of which is to define the properties of a car when bypassing an unexpected obstacle on a straight road section [6]. In addition, the path was marked out by posts that were numbered in order to enable precise identification of which of them had been knocked down by the car during the bypassing manoeuvre. The driver strove to maintain a constant speed during the manoeuvre.

Initially, the pressure in all the wheels of the tested car had a nominal value of 2.0 bar, as recommended by the manufacturer. In subsequent tests, before the car started to move, the pressure was reduced successively in one wheel to values of 1.5 and 1.0 bar, and in later tests it was reduced to a value of zero. The pressure in one wheel was completely eliminated before the test by removing the inner part of the tire valve, which guaranteed a gradual reduction of the pressure as the car was approaching the beginning of the test track [1]. Runs with reduced pressure were repeated

successively for all the wheels (Figure 3). In the final tests, the pressure was completely eliminated in all the wheels of the tested car.

5. Testing equipment

The parameters of devices and sensors used in the road tests have been shown in Table II. The movement of the vehicle and selected wheel was documented by three digital cameras (Casio EX-F1) with a standard frequency of 25 in Full HD mode and heightened frequency of 300 fps. After each test, the wheels were photographed.

6. Vehicle motion visualisation in PC-Crash program

A GPS-based Racelogic VBOX measurement system used in road tests enabled recording of the trajectory and velocity of the tested vehicle [11]. The GPS receiver fixed on the vehicle roof above its CG recorded the geographic position of the CG and the velocity as well as its deviation from north. The obtained data were reduced to the CG and transformed to the global coordinate system [7]. The resulting table of data was imported in text format to PC-Crash, in which the vehicle motion trajectory was visualised. In the diagrams, blue silhouettes of vehicles indicate the real motion of the tested car (Figures 6–17).

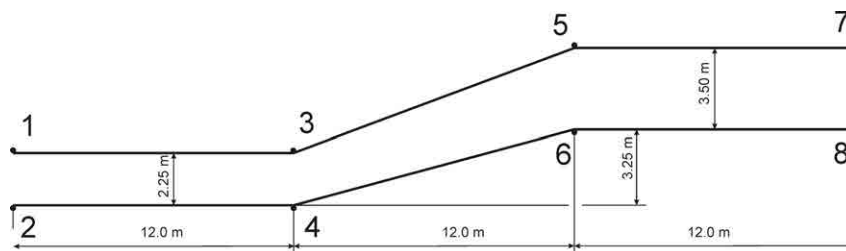


Fig. 2. Lane change path in accordance with norm BN-90/3615-/06 adopted in tests.



Fig. 3. The order of reduction and elimination of tire pressure.

TABLE II. MEASUREMENT EQUIPMENT USED IN ROAD TESTS

Measurement device	Parameter	Measurement range	Measurement precision
Universal measurement steering wheel, Kistler Group	Steering angle	± 1250°	≤ 0.1°
	Linear velocity	0.1–447 m/s	0.03 m/s, 0.1 km/h
GPS data logging system (RLV B3 and R10G10)	Heading	0–360°	0.1°
	Distance		0.05 %, < 50 cm/km
Inertial measurement unit (RLVBIMU03)	Acceleration: longitudinal, lateral, vertical	± 1.7 g	0.01 g
	Angular rate: roll, pitch, yaw	± 150°/s	0.0°/s

7. Simulations in PC-Crash program

The vehicle motion was simulated in PC-Crash 9.2, using a bilinear tire model [4, 10]. In the bilinear model, the maximum slip angle is the equivalent of cornering stiffness. Simulations were performed using both default bilinear tire characteristics, with a slip angle of 10° and modified characteristics, where the slip angle value was changed. The slip angle was changed so as to meet the following criteria: the vehicle moving along the assigned trajectory in the manner recorded in tests including running into the posts marking out the trajectory if this happened in the test, (criterion 1), minimum deviation of the vehicle motion trajectory in simulation from the trajectory recorded in the test (criterion 2).

In order to quantitatively evaluate the consistency of vehicle positions obtained in simulations with the real results (criterion 2), a quality function was selected, described by formula:

$$Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \cdot q_i)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}}$$

where: q_i – relative difference between the real value of the i -th parameter and that obtained in the simulation, w_i – weighting coefficient of the i -th parameter.

The relative difference q_i was determined for x, y coordinates of the longitudinal and lateral displacement of the centre of gravity of the vehicle, and yaw angles ψ for each integrated step, which was equal to 0.01 s. In the authors’ opinion, these positions of the vehicle are a meaningful indicator of the quality of simulation; hence the maximum value of weighting coefficients of these parameters, equal to one ($q_x = q_y = q_\psi = 1$), was adopted [12].

In the simulations with a vehicle whose wheels all had a nominal pressure, the slip angle was reduced to a value at which a satisfactory simulation was obtained. The determined values of the slip angle were used in subsequent simulations for wheels with nominal pressure. The timeline of the steering wheel angle was approximated by linear functions. Each linear section of the steering wheel angle timeline constituted a single sequence of the vehicle motion in the simulation (Figure 4).

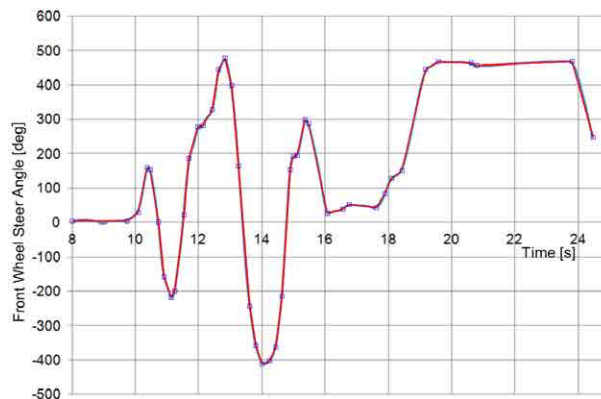


Fig. 4. Example of measured and approximated steering wheel angle (test no. 9).

The simulation started a few seconds before entering the defined path. The vehicle’s initial velocity corresponded to the velocity measured in the test, and the velocity in subsequent sequences of vehicle motion was corrected in order to be consistent with the recorded velocity (Figure 5). The simulation was considered completed when the vehicle stopped or its motion was stabilised.

In all the simulations, a global friction coefficient was adopted whose value of 0.78 was the mean value obtained in tests.

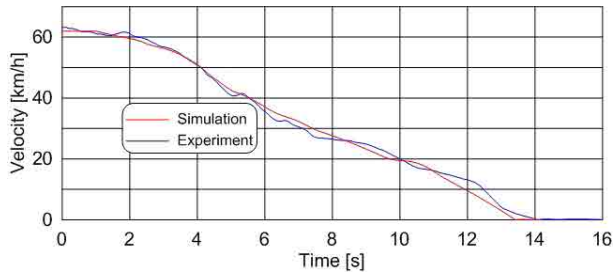


Fig. 5. Velocity-time graph for experiment and simulation (test no. 9).

8. Test results

8.1. Tests tabulation

The recorded tests (of motion along the defined path) have been tabulated (Table III). Data presented include the number of the test, the vehicle’s initial velocity on entering the path, as well as the number of knocked down posts and the car’s motion (skidding) following the bypassing manoeuvre.

TABLE III. MEASUREMENT RESULTS

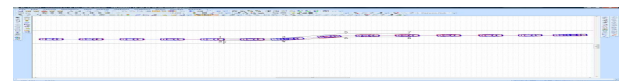
No.	Test	Pressure [bar]	Velocity [kph]	Remarks
1	All wheels	2.0	47	–
2	All wheels	2.0	61	Post 6 knocked over
3	All wheels	2.0	51	–
4	Left front wheel	1.5	51	–
5	Left front wheel	1.0	51	–
6	Left front wheel	0.0	60	Post 6 knocked over, slight running over
7	Right front wheel	0.0	48	–
8	Right front wheel	0.0	60	Post 6 knocked over
9	Left rear wheel	0.0	61	Post 6 knocked over, skidding
10	Right rear wheel	0.0	51	–
11	Right rear wheel	0.0	60	Post 3, 6 knocked over, skidding
12	All wheels	0.0	37	Post 6 knocked over, skidding

8.2. All wheels – 2.0 bar (nominal value)

Three runs of the vehicle with all wheels at nominal pressure were performed. Simulations performed with default bilinear tire characteristics failed to meet the adopted criteria, as in each simulation for a slip angle of 10°, the vehicle drove into post no. 6 and a significant deviation of the vehicle CG trajectory from the position obtained during the experiment was observed (Figure 6a). The most favourable results were obtained for modified bilinear characteristics in the slip angle range of 3° to 7°. In this range, the value of function Q reached the lowest values (Tables IV, V and VI).



a) Bilinear default



b) Bilinear 7-7-7-7

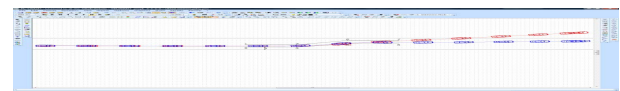


c) Bilinear 6-6-6-6

Fig. 6. Measured (blue silhouettes) and simulated (red silhouettes) movement trajectories of the vehicle (test no. 1).

TABLE IV. ANALYSIS OF ADOPTED CRITERIA (TEST NO. 1)

Model parameters/Experiment	Criterion 1	Q (Criterion 2)
Bilinear default	No (post 6)	0.45
Bilinear 7-7-7-7	Yes	0.40
Bilinear 6-6-6-6	Yes	0.38
Experiment	–	–



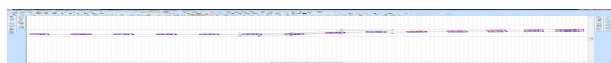
a) Bilinear default



b) Bilinear 5-5-5-5



c) Bilinear 4-4-4-4



d) Bilinear 3 – 3 – 3 – 3

Fig. 7. Measured (blue silhouettes) and simulated (red silhouettes) movement trajectories of the vehicle (test no. 2).

TABLE V. ANALYSIS OF ADOPTED CRITERIA (TEST NO. 2)

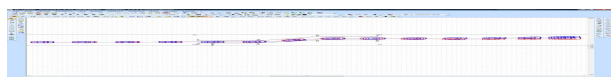
Model parameters/Experiment	Criterion 1	Q (Criterion 2)
Bilinear default	No (post 6, 7)	No
Bilinear 5 – 5 – 5 – 5	Yes (post 6)	0.81
Bilinear 4 – 4 – 4 – 4	Yes (post 6)	0.51
Bilinear 3 – 3 – 3 – 3	Yes (post 6)	0.58
Experiment	post 6	–



a) Bilinear default



b) Bilinear 4 – 4 – 4 – 4



c) Bilinear 3 – 3 – 3 – 3

Fig. 8. Measured (blue silhouettes) and simulated (red silhouettes) movement trajectories of the vehicle (test no. 3).

TABLE VI. ANALYSIS OF ADOPTED CRITERIA (TEST NO. 3)

Model parameters/Experiment	Criterion 1	Q (Criterion 2)
Bilinear default	No (post 6)	0.52
Bilinear 4 – 4 – 4 – 4	Yes	0.84
Bilinear 3 – 3 – 3 – 3	Yes	0.57
Experiment	–	–

8.3. Left front wheel – 1.5 bar

Simulations of the motion of a vehicle with the pressure in the left front wheel reduced to 1.5 bar showed that for default bilinear tire characteristics, the criteria are not met (Table VII). Satisfactory results were obtained after the slip angles of all wheels were reduced to 3.0° (Figure 9c).



a) Bilinear default



b) Bilinear 5 – 5 – 5 – 5



c) Bilinear 3 – 3 – 3 – 3

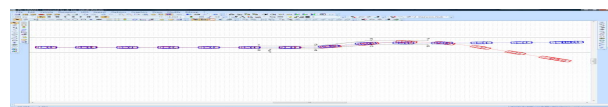
Fig. 9. Measured (blue silhouettes) and simulated (red silhouettes) movement trajectories of the vehicle (test no. 4).

TABLE VII. ANALYSIS OF ADOPTED CRITERIA (TEST NO. 4)

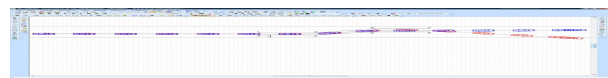
Model parameters/Experiment	Criterion 1	Q (Criterion 2)
Bilinear default	No (post 6)	1.16
Bilinear 5 – 5 – 5 – 5	Yes	1.00
Bilinear 3 – 3 – 3 – 3	Yes	0.33
Experiment	–	–

8.4. Left front wheel – 1.0 bar

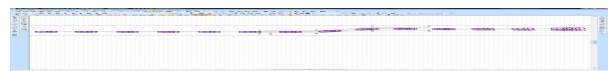
Simulations of a vehicle with pressure in the left front wheel of 1.0 bar performed with default bilinear characteristics failed to meet criterion no. 2 (Table VIII). In this simulation the vehicle CG deviated most from the trajectory assigned in tests. Reduction of slip angle of all the wheels diminished the discrepancies (Figure 10c).



a) Bilinear default



b) Bilinear 6 – 6 – 6 – 6



c) Bilinear 3 – 3 – 3 – 3

Fig. 10. Measured (blue silhouettes) and simulated (red silhouettes) movement trajectories of the vehicle (test no. 5).

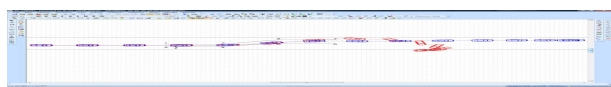
TABLE VIII. ANALYSIS OF ADOPTED CRITERIA (TEST NO. 5)

Model parameters/Experiment	Criterion 1	Q (Criterion 2)
Bilinear default	Yes	No
Bilinear 6 – 6 – 6 – 6	Yes	No
Bilinear 3 – 3 – 3 – 3	Yes	0.62
Experiment	–	–

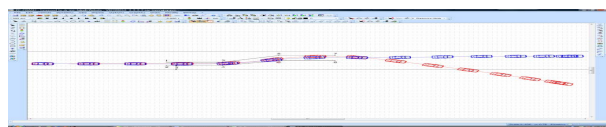
8.5. Left front wheel – 0.0 bar

Simulations of the motion of the vehicle with the pressure in the tire of the left front wheel eliminated completely – for default bilinear characteristics and identical slip angle in all the wheels – failed to meet the adopted criteria (Table IX). Criterion no. 1 was met after reducing the slip angle for the three wheels with nominal pressure and increasing the angle to a value of 11° for the wheel with no pressure (Figure 11c). A higher value than 11° caused the knocking down of post number 6 by the front, not by right side of the car, as happened during the experiment. The lowest value of the function Q was obtained for a value of about 30° for the wheel with no pressure (Table IX).

In this case, the results should be treated with extreme caution because a tire with no pressure loses its structural properties, lateral stiffness is reduced dramatically and in the unsteady motion state (e.g. turning left or countersteering to the right), the tire is displaced in relation to the stiff rim, resembling in its nature the phenomenon of play and friction. However, as long as the rim edge does not come into contact with the road surface the value of the friction coefficient itself is not reduced drastically. A value of 30° does not indicate that the slip angle for a tire with no pressure has been identified; it only indicates that at this particular value, it was possible to establish, as closely as possible, a model of the motion of a vehicle with three other efficient tires. Consequently, the obtained results cannot be used in other simulations in terms of quantity, but they can be treated as rough, qualitative indications of motion trends in boundary conditions. By the same token, reliable simulation of car motion with a larger number of tires with no pressure or one tire with no pressure and the remaining ones with reduced pressure is even less possible.



a) Bilinear default



b) Bilinear 3 – 3 – 3 – 3



c) Bilinear 11 – 3 – 3 – 3



d) Bilinear 30 – 3 – 3 – 3

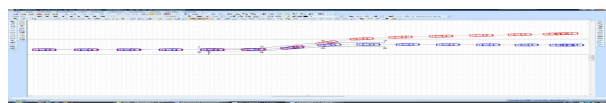
Fig. 11. Measured (blue silhouettes) and simulated (red silhouettes) movement trajectories of the vehicle (test no. 6).

TABLE IX. ANALYSIS OF ADOPTED CRITERIA (TEST NO. 6)

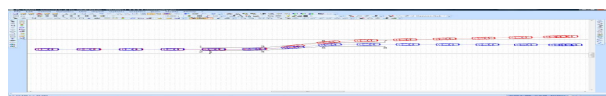
Model parameters/Experiment	Criterion 1	Q (Criterion 2)
Bilinear default	No (post 6, 7)	No
Bilinear 3 – 3 – 3 – 3	Yes (post 6)	No
Bilinear 11 – 3 – 3 – 3	Yes (post 6)	2.22
Bilinear 30 – 3 – 3 – 3	No (post 6)	0.84
Experiment	Post 6	–

8.6. Right front wheel – 0.0 bar

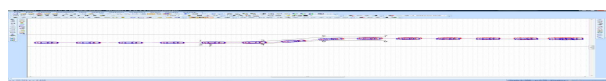
As in the case above, the criteria were met in the simulation when the pressure in the right front wheel was completely eliminated, slip angles in wheels with nominal tire pressure were reduced, and the angle for the wheel with no pressure was about 32° (Table X) and 40° (Table XI).



a) Bilinear default



b) Bilinear 4 – 4 – 4 – 4

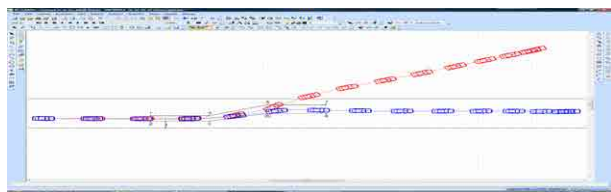


c) Bilinear 4 – 32 – 4 – 4

Fig. 12. Measured (blue silhouettes) and simulated (red silhouettes) movement trajectories of the vehicle (test no. 7).

TABLE X. ANALYSIS OF ADOPTED CRITERIA (TEST NO. 7)

Model parameters/Experiment	Criterion 1	Q (Criterion 2)
Bilinear default	No (post 5)	No
Bilinear 4 – 4 – 4 – 4	No (post 3, 5)	No
Bilinear 4 – 32 – 4 – 4	Yes	0.28
Experiment	–	–



a) Bilinear default



b) Bilinear 6 – 6 – 6 – 6



c) Bilinear 6 – 40 – 6 – 6

Fig. 13. Measured (blue silhouettes) and simulated (red silhouettes) movement trajectories of the vehicle (test no. 8).

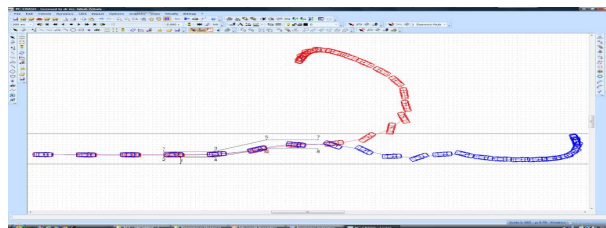
TABLE XI. ANALYSIS OF ADOPTED CRITERIA (TEST NO. 8)

Model parameters/Experiment	Criterion 1	Q (Criterion 2)
Bilinear default	No	No
Bilinear 6 – 6 – 6 – 6	No (post 3, 5)	No
Bilinear 6 – 40 – 6 – 6	Yes (post 6)	0.51
Experiment	Post 6	–

8.7. Left rear wheel – 0.0 bar

Simulation of the motion of a car with pressure eliminated from the left rear wheel was the most difficult. The problem was that the car skidded and in order to achieve stable motion, the driver had to perform many corrections of the motion trajectory. Slip angle change at the level of hundredths of a degree caused significant changes of the vehicle motion trajectory. The result of a simulation performed so that CG trajectories in the simulation and experiment were close to each other has been shown below. In this simula-

tion, the slip angles were: 5.79 – 5.79 – 21.88 – 5.79 (Figure 14b).



a) Bilinear default



b) Bilinear 5.79 – 5.79 – 21.88 – 5.79

Fig. 14. Measured (blue silhouettes) and simulated (red silhouettes) movement trajectories of the vehicle (test no. 9).

TABLE XII. ANALYSIS OF ADOPTED CRITERIA (TEST NO. 9)

Model parameters/Experiment	Criterion 1	Q (Criterion 2)
Bilinear default	Yes	No
Bilinear 5.79 – 5.79 – 21.88 – 5.79	No (post 3, 6, 7)	1.28
Experiment	Post 6	–

8.8. Right rear wheel – 0.0 bar

It was much easier to simulate the motion of a vehicle with pressure eliminated from the right rear tire. The criteria were met in a simulation when more stiff characteristics of wheels with nominal pressure and reduced stiffness of the wheel with no pressure with a slip angle of approximately 10° were adopted (Table XIII and XIV).



a) Bilinear default



b) Bilinear 7 – 7 – 7 – 7



c) Bilinear 7 – 7 – 7 – 11

Fig. 15. Measured (blue silhouettes) and simulated (red silhouettes) movement trajectories of the vehicle (test no. 10).

TABLE XIII. ANALYSIS OF ADOPTED CRITERIA (TEST NO. 10)

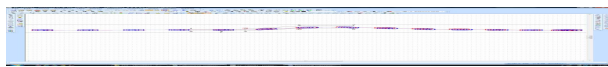
Model parameters/Experiment	Criterion 1	Q (Criterion 2)
Bilinear default	No (post 6)	1.73
Bilinear 7 – 7 – 7 – 7	No (post 8)	2.20
Bilinear 7 – 7 – 7 – 11	Yes	1.08
Experiment	–	–



a) Bilinear default



b) Bilinear 6 – 6 – 6 – 6



c) Bilinear 6 – 6 – 6 – 9.5

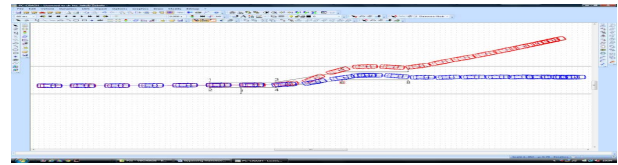
Fig. 16. Measured (blue silhouettes) and simulated (red silhouettes) movement trajectories of the vehicle (test no. 11).

TABLE XIV. ANALYSIS OF ADOPTED CRITERIA (TEST NO. 11)

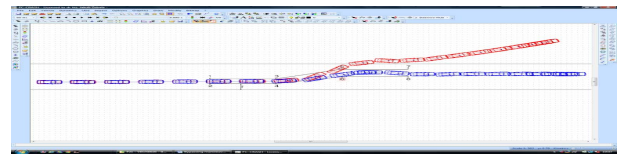
Model parameters/Experiment	Criterion 1	Q (Criterion 2)
Bilinear default	No (post 6, 8)	1.23
Bilinear 6 – 6 – 6 – 6	No (post 3, 6, 8)	0.48
Bilinear 6 – 6 – 6 – 9.5	Yes (post 3, 6)	0.36
Experiment	post 3, 6	–

8.9. All wheels – 0.0 bar

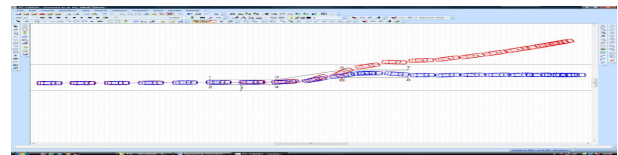
None of the simulations with pressure eliminated from all the tires met the adopted criteria (Figure 17). The considerable deviation of the vehicle CG trajectory between simulations and experiment allows us to ascertain that simulation of the motion of a vehicle with no pressure in the tires, using a bilinear tire model in PC-Crash, is not reliable (Table XV).



a) Bilinear default



b) Bilinear 20 – 20 – 20 – 20



c) Bilinear 30 – 30 – 30 – 30

Fig. 17. Measured (blue silhouettes) and simulated (red silhouettes) movement trajectories of the vehicle (test no. 12).

TABLE XV. ANALYSIS OF ADOPTED CRITERIA (TEST NO. 12)

Model parameters/Experiment	Criterion 1	Q (Criterion 2)
Bilinear default	No (post 5)	No
Bilinear 20 – 20 – 20 – 20	No (post 5)	No
Bilinear 30 – 30 – 30 – 30	No (post 5)	No
Experiment	post 6	–

9. Conclusions

1. Pressure reduction in one tire to a value of 1.0 bar does not significantly affect vehicle stability and steerability in a bypassing manoeuvre on a dry concrete road.
2. Stability and steerability are strongly affected by pressure reduction below 1.0 bar.
3. The simulations on a curvilinear path of a vehicle with nominal, reduced and completely eliminated pressure in one tire, using default bilinear tire characteristics, did not meet the adopted criteria.
4. In the simulations of motion of a vehicle with nominal tire pressure, the most favourable results were obtained for modified bilinear characteristics in a maximum slip angle range of 3° to 7°.
5. In the simulations of a vehicle with reduced and completely eliminated pressure, the criteria (both

or at least one) were met when the maximum slip angle of the unserviceable wheel was in the range of 10° to 40°. The model of the lateral dynamics of the vehicle is very sensitive to a change in the maximum slip angle, so the indicated uncertainty band cannot in any way be narrowed.

6. It is not possible to simulate the bypassing of an obstacle by a vehicle with no pressure in all the wheels using the bilinear tire model in PC-Crash.
7. Simulations at a vehicle velocity of about 60 km/h, at which skidding occurred, did not meet the adopted criteria.

Acknowledgement

This work was supported by the Institute of Forensic Research (project no. II/W–2012).

References

1. Andreatta D., Bixel R. A., Guenther D. A., An analysis of the time to deflate a ruptured tire, *Accident Reconstruction Journal* 2007, 17, 29–30.
2. Bixel R. A., Developments in vehicle center of gravity and inertial parameter estimation and measurement, SAE Technical Paper 950356, DOI: 10.4271/950356.
3. Blythe W., Day T. D., Grimes W. D., 3-Dimensional simulation of vehicle response to tire blow-outs, SAE Technical Paper 980221, DOI: 10.4271/980221.
4. Brach R. M., Brach, M. R., Tire models for vehicle dynamic simulation and accident reconstruction”, SAE Technical Paper 2009-01-0102, DOI: 10.4271/2009-01-0102.
5. Lozia Z., Simulation tests of biaxial vehicle motion after a tire blow-out, SAE Technical Paper 2005-01-0410, DOI: 10.4271/2005-01-0410.
6. Project of standard: Motor vehicle. Stability and steerability. Lane change manoeuvre and going a car into a bend, BN-90/3615-/06.
7. Rill G., Simulation von Kraftfahrzeugen, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig, Wiesbaden 1994.
8. Robinette R. D., Fay R. J., Drag and steering effects from disablements of run flat tires, SAE Technical Paper 2000-01-1316, DOI: 10.4271/2000-01-1316.
9. Robinette R., Deering D., Fay R. J., Drag and steering effects of under inflated and deflated tires, SAE Technical Paper 970954, 1997.
10. Wach W., Simulation of vehicle accidents using PC-Crash, Institute of Forensic Research Publishers, Kraków 2011.
11. www.racelogic.co.uk. [access 2013].
12. Zębała J., Wach W., Cięпка P. [et al.], Verification of ABS models applied in programs for road accident simulation, *SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems* 2010, 3, 72–99 [also: SAE Technical Paper 2010-01-0070, DOI: 10.4271/2010-01-0070].

Corresponding author

Dr inż. Jakub Zębała
Instytut Ekspertyz Sądowych
ul. Westerplatte 9
PL 31-033 Kraków
e-mail: jzebala@ies.krakow.pl

RUCH SAMOCHODU OSOBOWEGO Z OBNIŻONYM CIŚNIENIEM W OPONACH – EKSPERYMENT VS. SYMULACJA

1. Wprowadzenie

Zrekonstruowanie przebiegu wypadku obejmuje m.in. odtworzenie pozderzeniowego ruchu pojazdu. Ruch ten nierzadko bywa zakłócony obniżonym ciśnieniem w którymś z kół, spowodowanym uszkodzeniem opony w wyniku zderzenia lub najechania na elementy uszkodzonych pojazdów albo w wyniku zsunęcia się stopki opony z obręczy w czasie zderzenia. W skrajnym przypadku następuje wtedy całkowite rozszczelnienie opony, które powoduje przechylenie pojazdu, obniżenie sztywności skrętnej i promieniowej opony oraz wzrost oporów toczenia, co wpływa na własności dynamiczne: kierowność i stateczność pojazdu [3, 5]. Jazda na wprost z obniżonym ciśnieniem była przedmiotem badań, a opublikowane wyniki mają zakres wystarczający na potrzeby rekonstrukcji wypadków [8, 9]. Z tego względu wykonane przez autorów badania obejmowały ruch pojazdu z obniżonym i całkowicie usuniętym ciśnieniem w poszczególnych kołach po torze krzywoliniowym, adekwatnym do omijania nieoczekiwanej pojawiającej się przeszkody.

Bardzo duży wpływ na dynamikę poprzeczną pojazdu ma odporność opony na boczne znoszenie, która zmniejsza się wraz z obniżaniem ciśnienia. Zjawisko to w praktyce opiniodawczej zazwyczaj nie pozwala na jednoznaczne stwierdzenie, czy w konkretnym przypadku kierowca mógł wykonać skuteczny manewr omijania przeszkody. Przy znacznym ubytku ciśnienia w czasie jazdy po torze krzywoliniowym powstają siły poprzeczne powodujące przesuwanie się uszkodzonej opony względem obręczy, a nawet zetknięcie się samej obręczy z nawierzchnią jezdni skutkujące dodatkowo znaczącym zmniejszeniem współczynnika przyczepności.

Popularnym narzędziem stosowanym w rekonstrukcji przebiegu wypadku jest program PC-Crash. Należy jednak zauważyć, że w programie tym nie ma bazy danych rzeczywistych charakterystyk opon. Dostępne są jedynie charakterystyki domyślne modeli biliniowego i TMeasy opony, co stanowi istotne ograniczenie w zastosowaniu tego programu. Szczególnie ograniczenie to dotyczy modelu opony TMeasy, który wymaga znajomości 10 parametrów. W ramach opracowania wyników podjęto próbę zasymulowania w tym programie ruchu badanego pojazdu z obniżonym i usuniętym ciśnieniem w oponach, stosując wyłącznie biliniowy model opony (rycina 1). Jest to najprostszy model, w którym zmianę charakterystyki siły porzeczej opony realizuje się poprzez zmianę wartości tylko jednego parametru, jakim

jest maksymalny kąt znoszenia (określony w tekście skrótem „kąt znoszenia”).

Jeden parametr modyfikujący model zdecydowanie ogranicza liczbę symulacji, jakie należy wykonać, aby uzyskać poprawny wynik. Nie można wykluczyć, że wynik ten nie będzie mniej dokładny od wyniku symulacji z zastosowaniem bardziej zaawansowanego modelu o większej liczbie parametrów.

2. Cel i zakres badań

Cel badań obejmował:

- określenie wpływu obniżonego ciśnienia w jednej oponie na stateczność i kierowność samochodu podczas wykonywania manewru omijania przeszkody na prostym odcinku drogi;
- określenie warunków stosowania biliniowego modelu opony wykorzystanego w programie PC-Crash w symulacji analogicznego manewru – określenie zakresu niepewności;
- sformułowanie praktycznych wskazówek dotyczących rzeczywistego i symulowanego ruchu samochodu.

Zamierzony cel został zrealizowany poprzez wykonanie prób stanowiskowych i drogowych z rejestracją parametrów ruchu pojazdu. Następnie przeprowadzono obliczenia symulacyjne, których wyniki porównano z wynikami eksperymentów. Do badań użyto samochodu osobowego marki Daewoo Nubira (rok produkcji 1999), w którym założone były opony marki Pirelli P6000 o rozmiarze 185/65 R14 86H.

3. Badania stanowiskowe

W pierwszym etapie wykonano badania stanowiskowe samochodu Daewoo, których celem była parametryzacja jego modelu w programie PC-Crash. Badania te obejmowały wyznaczenie: rozkładu masy na poszczególne koła, wysokości położenia środka masy, położenia środka masy względem osi przedniej, momentu bezwładności samochodu względem osi pionowej, charakterystyk sztywności zawieszek oraz wartości przełożenia układu kierowniczego (tabela 1). Przedstawione w tabeli wartości momentów bezwładności względem osi wzdłużnej i poprzecznej obliczono na podstawie równań opublikowanych w pozycji [2]. Badany pojazd nie był specjalnie przygotowywany do testów. Przed badaniami był on regularnie eksploatowany, a naprawy wykonywano na

bieżący w celu utrzymywania pojazdu w dobrym stanie technicznym.

4. Badania drogowe

Badania drogowe wykonano na suchej, betonowej nawierzchni w warunkach letnich. Tor zmiany pasa ruchu był wyznaczony zgodnie z zaleceniami projektu normy branżowej BN-90/3615-/06 (rycina 2), której przedmiotem jest określenie własności samochodu osobowego w czasie omijania nieoczekiwanej pojawiającej się przeszkody na prostoliniowym odcinku drogi [6]. Słupki wyznaczające tor zmiany pasa ruchu zostały oznaczone cyframi, aby można było jednoznacznie opisać, który z nich został najechany lub potrącony w czasie próby. W czasie każdej próby kierujący miał utrzymywać stałą prędkość jazdy.

Podczas pierwszych prób badany samochód miał we wszystkich oponach nominalne, zalecane przez producenta ciśnienie wynoszące 2,0 bary. W następnych próbach, przed rozpoczęciem przejazdu, obniżano ciśnienie w jednej oponie, kolejno do wartości 1,5 i 1,0 bara, a w dalszych próbach realizowano przejazdy po całkowitym usunięciu ciśnienia w oponie. Całkowite usunięcie ciśnienia w jednej oponie było realizowane poprzez wykręcenie wkładu zaworu powietrznego, co powodowało stopniowe zmniejszanie ciśnienia w czasie dojeżdżania do początku toru pomiarowego [1]. Przejazdy z obniżonym ciśnieniem powtarzano kolejno dla wszystkich kół, a na zakończenie wykonano próby z usuniętym ciśnieniem we wszystkich oponach badanego samochodu (rycina 3). Na zakończenie badań wykonano próby po usunięciu ciśnienia we wszystkich oponach badanego samochodu.

5. Aparatura pomiarowa

Parametry urządzeń i czujników wykorzystanych w badaniach drogowych zestawiono w tabeli II. Ruch pojazdu w czasie prób rejestrowano za pomocą trzech kamer cyfrowych Casio EX-F1 ze standardową częstotliwością zapisu obrazu 25 klatek na sekundę przy rejestracji w trybie Full HD oraz z częstotliwością zwiększoną do 300 klatek/s. Po każdym przejeździe dokumentowano stan opon badanego pojazdu.

6. Wizualizacja ruchu pojazdu w programie PC-Crash

Zastosowany w badaniach drogowych układ pomiarowy GPS pozwalał na rejestrację toru ruchu i prędkości badanego samochodu [11]. Antena GPS zamocowana na

dachu dokładnie ponad środkiem masy pojazdu wyznaczała położenie geograficzne środka masy i jego prędkość oraz kąt odchylenia wektora tej prędkości od kierunku północnego. Aby można było wykorzystać otrzymane dane, należało zredukować je do środka masy testowego pojazdu i wykonać transformację do globalnego układu odniesienia [7]. Otrzymaną tablicę danych zaimportowano w formacie tekstowym do programu PC-Crash, w którym wykonano wizualizację toru ruchu pojazdu. Niebieskie sylwetki pojazdów na rycinach przedstawiają rzeczywisty ruch testowego pojazdu (ryciny 6–17).

7. Symulacje w programie PC-Crash

Symulację ruchu pojazdu wykonano w programie PC-Crash 9.2, stosując wyłącznie biliniowy model opony [4, 10]. W biliniowym modelu opony odpowiednikiem sztywności poprzecznej jest maksymalny kąt znoszenia. Symulacje były wykonywane zarówno dla domyślnej charakterystyki, w której kąt znoszenia wynosił 10°, jak i dla zmodyfikowanych charakterystyk, w których zmieniano wartości kąta znoszenia. Kąt znoszenia zmieniano w takim zakresie, aby zostały spełnione następujące kryteria: przejechanie przez samochód wyznaczonego toru w sposób zarejestrowany w czasie badań z uwzględnieniem najechań na słupki wyznaczające ten tor (jeżeli w czasie próby doszło do takich najechań, kryterium 1) i minimum odchylenia toru ruchu pojazdu w symulacji od toru ruchu zarejestrowanego w czasie próby (kryterium 2).

Aby ocenić w sposób ilościowy zgodność położenia pojazdów uzyskanych w symulacjach z wynikami rzeczywistymi (kryterium 2), wybrano funkcję jakości określoną wzorem:

$$Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \cdot q_i)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}}$$

gdzie q_i to względna różnica pomiędzy rzeczywistą a uzyskaną w symulacji wartością parametru i , zaś w_i to współczynnik wagowy parametru i .

Względną różnicę q_i określono dla współrzędnych x , y przemieszczenia wzdłużnego i poprzecznego środka masy pojazdu oraz kąta odchylenia ψ dla każdego kroku całkowania równego 0,01 s. Zdaniem autorów, położenia te są miarodajnym wskaźnikiem jakości symulacji, stąd przyjęto dla tych parametrów maksymalną wartość współczynników wagowych równą 1 [12].

W symulacjach z udziałem samochodu, w którym wszystkie koła miały nominalne ciśnienie, zmniejszono kąt znoszenia do takiej wartości, przy której uzyskano zadowalający przebieg symulacji. Wyznaczone w ten

sposób wartości kątów znoszenia wykorzystano w kolejnych symulacjach dla trzech kół, w których zachowane było ciśnienie nominalne.

Na potrzeby symulacji zmierzony podczas prób drogowych czasowy przebieg kąta skrętu kierownicy został aproksymowany funkcjami liniowymi (rycina 4). Każdy liniowy fragment przebiegu kąta skrętu kół stanowił pojedynczą sekwencję ruchu pojazdu.

Symulacje rozpoczynano kilka sekund przed wjechaniem samochodu na wyznaczony tor ruchu. Prędkość początkowa pojazdu odpowiadała prędkości zmierzonej w czasie próby, a prędkość w kolejnych sekwencjach ruchu pojazdu była korygowana tak, aby uzyskać zgodność z zarejestrowaną prędkością (rycina 5). Koniec symulacji następował po zatrzymaniu samochodu lub po ustabilizowaniu się jego ruchu. We wszystkich symulacjach przyjęty został globalny współczynnik przyczepności, którego wartość 0,78 była średnią wartością uzyskaną w czasie badań.

8. Wyniki badań

8.1. Zestawienie prób

Zarejestrowane próby zestawiono w tabeli III, w której podano prędkość samochodu na początku wjeżdżania na wyznaczony tor i uwagi dotyczące przejazdu, a w szczególności numer potrąconego lub najechanego słupka oraz sposób ruchu pojazdu po wykonaniu manewru omijania (zjawisko zarzucania).

8.2. Wszystkie koła z ciśnieniem nominalnym – 2,0 bary

Wykonano trzy przejazdy samochodem, w którym w oponach wszystkich kół było ciśnienie nominalne. Symulacje wykonane przy zastosowaniu domyślnej charakterystyki biliniowej opony nie spełniały przyjętych kryteriów, gdyż w każdej symulacji dla wartości kąta znoszenia 10° samochód najeżdżał na słupki nr 6, a także występowało duże odchylenie toru środka masy pojazdu od położenia uzyskanego w czasie eksperymentu (rycina 6a). Wyniki najlepiej spełniające przyjęte założenia uzyskano dla zmodyfikowanych charakterystyk biliniowych opon w zakresie kątów znoszenia od 3° do 7° . W tym zakresie charakterystyk biliniowych funkcja Q osiągała najmniejsze wartości (tabela IV, V, VI).

8.3. Koło przednie lewe – ciśnienie 1,5 bara

Symulacje ruchu pojazdu z ciśnieniem w lewym przednim kole obniżonym do wartości 1,5 bara wykazały, że dla domyślnej charakterystyki opon nie są spełnione przyjęte kryteria (tabela VII). Zadawałające wyniki uzy-

skano po obniżeniu wartości kątów znoszenia wszystkich kół do wartości rzędu $3,0^\circ$ (rycina 9c).

8.4. Koło przednie lewe – ciśnienie 1,0 bara

Dla próby z ciśnieniem wynoszącym ok. 1 bara w lewym przednim kole symulacje wykonane przy zastosowaniu domyślnej wartości kąta znoszenia nie spełniały drugiego kryterium (tabela VIII), gdyż tor ruchu środka masy pojazdu był najbardziej odchylony od toru wyznaczonego w czasie testu. Obniżanie wartości kąta znoszenia wszystkich kół prowadziło do zmniejszenia rozbieżności (rycina 10c).

8.5. Koło przednie lewe – ciśnienie 0,0 bara

Przy całkowicie usuniętym ciśnieniu w oponie lewego przedniego koła dla przyjętej we wszystkich kołach jednakowej wartości kąta znoszenia symulacje ruchu pojazdu nie spełniały przyjętych kryteriów (tabela IX). Po zwiększeniu kąta znoszenia dla koła bez ciśnienia do wartości 11° i zmniejszeniu go dla trzech pozostałych kół spełnione zostało tylko kryterium 1 (rycina 11c). Przyjęcie większej od 11° wartości kąta znoszenia powodowało najechanie na słupki nr 6 nie prawym bokiem pojazdu, jak to było w czasie testu, tylko jego przodem. Najmniejszą wartość funkcji Q uzyskano dla kąta znoszenia 30° dla koła bez powietrza (tabela IX). W tym przypadku do wyników należy podchodzić z dużym dystansem, ponieważ opona bez ciśnienia traci swoje konstrukcyjne właściwości, sztywność poprzeczna gwałtownie spada i w stanie ruchu niestabilnego (np. skręt w lewo i przeciwny skręt w prawo) przemieszcza się względem sztywnej obryczy, przypominając w swojej istocie zjawisko luzu i tarcia. Jednak dopóki krawędź obryczy nie zetknie się z nawierzchnią, wartość samego współczynnika przyczepności nie obniża się drastycznie. Wartość 30° nie oznacza, że zidentyfikowano kąt znoszenia dla opony bez ciśnienia, ale jedynie tyle, że przy takiej właśnie wartości udało się w sposób bardzo przybliżony ustalić model ruchu pojazdu ze sprawnymi trzema pozostałymi oponami. Z powyższych wyników nie można więc korzystać w innych symulacjach w sensie ilościowym, a jedynie traktować jako zgrubne, jakościowe wskazanie trendu ruchu w stanach granicznych. Tym bardziej nie jest możliwe miarodajne symulowanie ruchu samochodu z większą liczbą opon bez ciśnienia lub z jedną oponą bez ciśnienia, a innymi z obniżonym ciśnieniem.

8.6. Koło przednie prawe – ciśnienie 0,0 bara

Dla tej próby, podobnie jak w poprzednim przypadku, symulacja ruchu pojazdu spełniała przyjęte kryteria wówczas, gdy obniżone zostały kąty znoszenia dla kół z nominalnym ciśnieniem, a wartość kąta znoszenia dla

koła bez ciśnienia wynosiła 32° (tabela X) i 40° (tabela XI).

8.7. Koło tylne lewe – ciśnienie 0,0 bara

Symulacja ruchu samochodu z ciśnieniem usuniętym w lewym tylnym kole należała do najtrudniejszych. Problem polegał na tym, że pojazd był zarzucany, a osiągnięcie statecznego ruchu wymagało od kierowcy wielokrotnego korygowania toru jazdy. Zmiana kąta znoszenia na poziomie setnych części stopnia powodowała istotne zmiany toru ruchu samochodu. Poniżej przedstawiono wynik jedynej symulacji, jaką udało się wykonać w takim stopniu, aby toru ruchu środka masy w symulacji i eksperymencie były zbliżone. W symulacji tej wartości kątów znoszenia wyniosły: 5,79 – 5,79 – 21,88 – 5,79 (rycina 14b).

8.8. Koło tylne prawe – ciśnienie 0,0 bara

Zdecydowanie łatwiej można było zasymulować ruch pojazdu z usuniętym ciśnieniem w prawym tylnym kole. Wyznaczone kryteria spełniała symulacja, w której przyjęto sztywniejsze charakterystyki kół z nominalnym ciśnieniem i zredukowaną sztywnością do wartości kąta znoszenia wynoszącego około 10° dla koła bez ciśnienia (tabela XIII, XIV).

8.9. Wszystkie koła – 0,0 bara

Wielokrotne próby zasymulowania ruchu pojazdu z ciśnieniem usuniętym ze wszystkich opon nie prowadziły do spełnienia przyjętych kryteriów (rycina 17). Duże odchylenie toru ruchu środka masy pojazdu w symulacjach i eksperymencie pozwala na stwierdzenie, że nie jest miarodajna symulacja ruchu pojazdu jadącego bez ciśnienia w oponach wszystkich kół przy wykorzystaniu w programie PC-Crash biliniowego modelu opony (tabela XV).

9. Wnioski

1. Obniżenie ciśnienia w jednym kole do wartości ok. 1,0 bara nie ma istotnego wpływu na stateczność i kierowalność samochodu w czasie wykonywania manewru omijania przeszkody.
2. Istotny wpływ na stateczność i kierowalność miało obniżenie ciśnienia poniżej 1 bara.
3. Symulacje ruchu pojazdu po torze krzywoliniowym z nominalnym, obniżonym albo całkowicie usuniętym ciśnieniem w jednej oponie przy zastosowaniu domyślnej biliniowej charakterystyki opony nie spełniały przyjętych kryteriów.

4. W symulacjach ruchu pojazdu z nominalnym ciśnieniem w oponach najlepsze wyniki uzyskano dla zmodyfikowanych biliniowych charakterystyk opon w przedziale maksymalnych kątów znoszenia od 3° do 7°.
5. W symulacjach ruchu pojazdu z obniżonym i całkowicie usuniętym ciśnieniem przyjęte kryteria (obydwa lub co najmniej jedno) zostały spełnione, jeżeli dla niesprawnego koła wartość maksymalnego kąta znoszenia mieściła się w przedziale od 10° do 40°. Model dynamiki poprzecznej pojazdu jest bardzo wrażliwy na zmianę maksymalnego kąta znoszenia opony, dlatego wskazanego pasma niepewności nie da się w żaden sposób zawęzić.
6. Przy wykorzystaniu w programie PC-Crash biliniowego modelu opony nie jest możliwe zasymulowanie omijania przeszkody przez samochód z wszystkimi kołami pozbawionymi ciśnienia.
7. Przy prędkości rzędu 60 km/h, przy której dochodziło do zarzucania samochodu, symulacje ruchu pojazdu nie spełniały przyjętych kryteriów.

Podziękowanie

Projekt został wykonany w Instytucie Ekspertyz Sądowych w Krakowie w ramach pracy badawczej nr II/W–2012.